

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**



F1000112402B



SUOMI - FINLAND (FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS PATENT- OCH RÄGISTERSTYRELSEN

(12) PATENTTIJULKAISU PATENTSKRIFT

(10) FI 112402 B

(45) Patentti myönnetty - Patent beviljats

28.11.2003

(51) Kv.lk.7 - Int.kl.7

G06F 19/00, G01S 13/00, 17/00, G01C 5/00

(21) Patenttihakemus - Patentansökning

19992319

(22) Hakemispäivä - Ansökningsdag

28.10.1999

(24) Alkupäivä - Löpdag

28.10.1999

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig

29.04.2001

(73) Haltija - Innehavare

1 •Diware Oy, Nuottakuja 2 D, 02230 Espoo, SUOMI - FINLAND, (FI)

(72) Keksijä - Uppfinnare

1 •Hyypä, Juha, Nuottakuja 2 D, 02230 Espoo, SUOMI - FINLAND, (FI)

(74) Asiamies - Ombud: Innopat Oy
Tekniikantie 21, 02150 Espoo

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

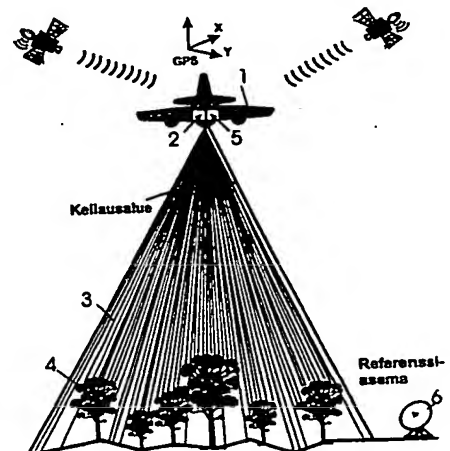
Menetelmä puustotunnusten määrittämiseksi sekä tietokoneohjelma menetelmän suorittamiseksi
Förfarande för bestämning av egenskaper hos trädbestånd samt datorprogram för att utföra förfarandet

(56) Viitejulkaisut - Anförda publikationer

JP 9184880 A, JP 11248443 A, JP 11023263 A,
Remote sensing of environment, vol. 60, nro 3, 1997, USA, Nelson R., "Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shape",
pp. 327-334, Simulation, vol. 49, nro 1, July 1987, USA, Balick LK, "A forest canopy height surface model for scene simulation",
pp. 5-12, IGARSS' 93. 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 93), Better Understanding of
Earth Environment (Cat. Nro 93CH3294-6), Pt. vol. 2, New York, NY, USA, 1993, IEEE, Gjertsen AK, "Testing TM and SPOT data
as input to a canopy reflectance model for mapping density and size of trees in forest stands", pp 750-752, Proceedings of the SPIE
- The International Society for Optical Engineering, vol. 2598, 1995, USA, Holm M, "Global object reconstruction using airborne
video imagery: the ESPRIT-III GLORE project", pp 306-314, Machine Vision and Applications, vol. 11, nro 2, 1998, Germany,
Brandtberg T; Walter F, "Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale
analysis", pp 64-73

(57) Tiivistelmä - Sammandrag

Keksinnön kohteena on menetelmä puustotunnusten määrittämiseksi puuston
yläpuolella mittaavan laitteen avulla. Menetelmässä puustosta kerätään kolmiulot-
teista tietoa puustoaalueelta käyttämällä sellaista määrää näytepisteitä, että yksit-
täiset puut tai puuryhmät erottuvat toisistaan. Kerätyistä tiedoista tuotetaan
kolmiulotteinen puuston pituusmalli, josta määritetään puustotunnuksia, jotka ovat
yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuuksia ja/tai niiden avulla saatuja laa-
jempien alueiden tietoja. Keksinnön kohteena on myös tieokoneohjelma, jolla
voidaan toteuttaa menetelmän toinen ja kolmas vaihe.



1991. *Satellite image-based national forest inventory of Finland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 28: 419-424). Tällöin tyypillisesti maastoinventoinnin koealatuloksia käytetään menetelmän opetusaineistona ja koko satelliittikuvaa käytetään yleistämään nämä tarkasti koealoilta mitatut tiedot koko kuvan alueelle. Edellytyksenä onnistuneelle ratkaisulle pienillä alueilla on se, että satelliittikuvasta tulee löytää piirteitä (kanavia, niiden suhteita tms), jotka korreloivat voimakkaasti koealoilta määritettyjen puustotunnusten kanssa. Niinpä menetelmä onkin sovelias vain erittäin laajojen alueiden inventointiin. Parantamalla kaukohavainnointiaineistoa, esimerkiksi lentokoneesta tehtävillä kuvauksilla, voidaan parantaa myös sen tarkkuutta. Huolimatta tästä kuvioittaisen arvioinnin vaatimaa tarkkuutta (noin 15% virhe sallittu, R. Päivinen, A. Pussinen, and E. Tomppo, 1993, "Assessment of boreal forest stands using field assessment and remote sensing", *Proceedings of Earsel 1993 Conference "Operationalization of Remote Sensing", ITC Enshedene, The Netherlands, 19-23 huhtikuu, 1993, 8s.*) ei ole kaukohavainnointimenetelmin saavutettu.

Esimerkiksi Suomessa metsäorganisaatioiden toimesta tehtävä kuvioittainen inventointi tehdään kokonaan maastotyönä ja valtakunnan metsien inventointiin käytetään satelliittikuvia (kuten Landsat TM-kuvia, joiden erotuskyky on 30 m). Varsin perusteellinen selvitys eri aineistojen tarkkuudesta kuvioittaiseen arviointiin on esitetty julkaisuissa (J. Hyypä, Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. and Zhu, Y-H., 1998. *Accuracy of different remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. Proceedings of the First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry. Lake Buena Vista, Florida, USA, 1-3 kesäkuu 1998, Volume I, s. 370-377.* ja J. Hyypä, Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., Zhu, Y-H., 1999a, *Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes, Journal of Forest Ecology and Management (in press)*). Hakijan tiedossa ei ole olemassa aiemmin tunnettuja kuvioittaisen arvioinnin vaatimuksia täyttävää kaukohavainnointiaineistoa.

30

Toisenlainen menetelmä metsäpalstan runkosuureiden laskemiseksi on esitetty FI-patentissa 101016 B. Menetelmä optisesti rekisteröi valitussa pisteessä tietyllä säteellä kaikki puut 360 asteen kierrolla. Mittauksessa käytetään esimerkiksi

AccuRange 3000-LIR Laser etäisyysmittaria, jonka mittaustarkkuus on 1/65535-osaa 360° :sta tai pulssianturia. Rekisteröinti suoritetaan kiertokulman mittarilla siten, että tangenttikulma lasketaan absoluuttisten kiertokulmien erotuksena rungon molemmin puolin havaituista etäisyysmittauksen epäjatkuvuuskohdista. Menetelmää (FI-patentti 101016 B) voidaan käyttää perinteisen koealatietojen automatisointiin, mutta se edellyttää silti työskentelyä maastossa ja on varsin hidas (yhden kierroksen mittausajan tulee olla 1-6 min, jotta tietokone ehtii siirtää mittaustiedot). Menetelmä perustuu myös läpimittojen kautta tapahtuvaan inventointiin, joka tapahtuu horisontaalisella mittauksella. Ongelmana tässä FI-patentin 101016 B mukaisessa ratkaisussa on etenkin se, että esitetty menetelmä hitautensa puolesta soveltuu vain pieneen näyteenottoon koko puustosta.

Lentokoneesta ja helikopterista on mitattu metsäalueiden puuston pituutta aikaisemmin myös käyttäen lasereita ja radiotaajuustutkia. Aikaisemmat tutkimukset perustuivat poikkileikkauksen mittaamiseen metsäalueilta (lentolinjaa pitkin mitattiin puuston pituutta laserin/radiotaajuustutkan keilan valaisemalta alueelta). Esimerkkejä tällaisista tutkimuksista ovat mm. R. Nelson, Krabill, W.B., and Maclean, G.A. 1984, "*Determining forest canopy characteristics using airborne laser data*", *Remote Sensing Environment*, 15:201-212, ja J. Hyypä, Hallikainen, M., 1996. *Applicability of airborne profiling radar to forest inventory. Remote Sensing Environment*, 57: 39-57. Yksittäisiä puita ei ole näissä tutkimuksissa pystytty analysoimaan, koska kuvat olivat kaksiuotteisia poikkileikkauksia. Mittauksilla on saatu puuston pituus ja siitä regressiokaavoilla johdettua muita pituuden johdannaisia. Mm. tilavuuden osalta puusto tilavuuden virhe oli parhaimmillaan 26.5 %, mikä ei riitä operatiiviseen mittaukseen.

Näset (esim. E. Näset, "*Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data*", *ISPR J. Photogramm. Remote Sensing*, 52, s. 49-56, 1997.) on pystynyt tuottamaan laserkeilauksella tasaisesti näytteitä metsästä, mutta puustotunnusten estimointi tapahtui puhtaasti tilastollisesti likimain samalla tavoin kuin aikaisemmat profiilimittaukset. Mm. keskipituusestimaattina käytettiin tietynkokoisen ikkunan sisältä otettujen lasenäytteiden minimejä ja maksimejä.

Vuonna 1999 Hyyppä ym. (J. Hyyppä, Hyyppä, H., Samberg, A., 1999, Assessing Forest Stand Attributes by Laser Scanner, *Laser Radar Technology and Applications IV*, Proceedings of SPIE, 3707: 57-69.) esitti, että on mahdollista mitata tarpeeksi tiheällä pulssiverkolla metsän valtapuuston pituus. Tässä tutkimuksessa kokeiltiin myös pituusnäytteiden avulla tapahtuvaa tilavuuden estimointia samalla tavoin kuin edellä mainituissa pituusmittauksissa, joissa käytettiin laserlaitteita ja radiotaajuustutkia. Lisäksi tutkimuksessa esitettiin todellisuutta vastaava laserkeilaindatan avulla tuotettu puuston pituusmalli. Tutkimuksessa ei tunnistettu yksittäisiä puita eikä puustotunnuksia.

10

Myös Gunilla Borgefors ym. (Gunilla Borgefors, Tomas Brandberg, Fredrik Walter "Forest parameter extraction from airborne sensors", APRS, Vol.32, Part3-2WS,"Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imaging", München 8-10 syyskuuta 1999, s. 151-158) on esittänyt laserdatan hyväksikäyttämistä puiden tunnusten määrittämisessä. Julkaisussa on määritetty puiden lukumäärä ja niiden latvojen koko lasertiedon avulla saadusta kuvasta analysoimalla kuvasta näkyviä eri alueiden korkeuseroja referenssitason nähden. Yksittäisten puiden todellisia pituuksia ei tässä julkaisussa analysoitu.

15

20 Laser- ja tutkatekniikkaa on myös yleisesti käytetty maastomallien tekemiseen mittaamalla ylhäältäpäin lentokoneesta kohteen ja tutkan (yleisnimitys sekä lasertutkalle että radiotaajuustutkalle) välinen etäisyys pulssin kulkuajan perusteella. Lasertutkaa kutsutaan yleisesti myös lidariksi (light detection and ranging). Tällöin laserkeilain pyyhkäisee tutkan muodostamaa laser-pulssia lentosuuntaa vastaan kohtisuoraan. Tällä tavalla katetaan koko kohteen ala. Alueelta saadaan lähes vierekkäisiä keiloja (keilan halkaisija tyypillisesti muutama kymmen senttimetriä), joista jokaiselle saadaan määritettyä x-, y- ja z-koordinaatit. Näitä pisteitä analysoimalla voidaan tuottaa erilaisia maastomalleja. Radiotaajuustutka toimii samalla periaatteella kuin lasertutka, lähetettävän signaalin taajuus on vain radiotaajuusalueella. Radiotaajuustutkilla keilaus on mahdollista toteuttaa joko elektronisesti tai mekaanisesti. Tyypillisesti radiotaajuusalueella antennin synnyttämän keilan koko maanpinnalla on useita metrejä, toisaalta SAR-tekniikalla

25

30

(engl. ~~Synthetic~~ Synthetic Aperture Radar) voidaan parantaa huomattavasti radiotaajuustutkan erotuskykyä. Radiotaajuustutkilla voidaan mitata samanaikaisesti sekä latvan että maanpinnan etäisyys tutkaan nähden, joten erilaisten maastomallien tuottaminen radiotaajuustutkilla on yksinkertaisempaa, toisaalta erotuskyky on vaikea saada yhtä
5 hyväksi kuin nykyisillä ja tulevilla laserkeilaimilla, jotka pystyvät lähes 100 kHz pulssintoistataajuuteen, jolloin kohde voidaan kartoittaa jopa 0,5 metrin erotuskyvyllä.

Keksinnön tarkoituksena on aikaansaada kaukohavainnointimenetelmä metsien
10 inventointiin ja puustotunnusten määrittämiseen, joka on aikaisempia kaukohavainnointimenetelmiä nopeampi, tarkempi, mahdollistaa paremman tulosten jatkokäsittelyn ja on suhteellisen kustannustehokas.

15 YHTEENVETO KEKSINNÖSTÄ

Keksinnön mukainen menetelmä puustotunnusten määrittämiseksi puuston
yläpuolella mittaavan laitteen avulla on pääasiassa tunnettu siitä, että puustosta
kerätään kolmiulotteista tietoa puustoalueelta käyttämällä sellaista määrää
20 näytepisteitä, että yksittäiset puut tai puuryhmät erottuvat toisistaan. Kerätyistä tiedoista tuotetaan kolmiulotteinen puuston pituusmalli. Saadusta pituusmallista määritetään puustotunnuksia, jotka ovat yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuuksia ja/tai niiden avulla saatuja laajempien alueiden tietoja.

25 Puustotunnusten määrittäminen keksinnössä tapahtuu edullisimmin kolmessa vaiheessa

- 1) Hyväreoluutioisen kolmiulotteisen mittauksen tekeminen puustoalueelta.
- 2) Kolmiulotteisen puuston pituusmallin laskeminen tuotetusta aineistosta.
- 3) Puustotunnusten määrittäminen puuston pituusmallista yksittäisten puiden ja
30 puuryppäiden avulla.

Keksinnön mukaisen menetelmän toinen ja kolmas vaihe voidaan toteuttaa tietokoneohjelman avulla.

Hyväresoluutioisella tai hyvän erotuskyvyn omaavalla tässä tarkoitetaan aineistoa, josta pystyy havaitsemaan erikseen yksittäisiä puita.

Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä, monilla talousmetsäalueilla ja muissakin metsäalueilla on selviä aukkoja puiden välissä. Esimerkiksi tiheässä metsässä Suomessa yli 30 % laserpulsseista kuitenkin heijastuu maasta. Lisäämällä laserkeilaimien pulssitaajuutta (lähetettyjen laserpulssien määrää sekunnissa) merkittävästi voidaan laserkeilaimen avulla saada näytteitä jokaisen puun latvasta ja puiden välisestä maasta. Laserpulsseja tulee tällöin olla useita neliometriä kohden. Tämä mahdollistaa hyväerotuskykyisen puustokartan tekemisen laserkeilaimen tuottamasta aineistosta. Kun tätä aineistoa käsitellään, siitä saadaan laskettua maastomalli ja latvamalli sekä niiden erotus, eli puuston pituusmalli. Pituusmallia analysoimalla esimerkiksi hahmontunnistuksen menetelmin voidaan määrittää yksittäisten puiden sijainti, puiden pituus, latvuksen leveys, puulaji ja niiden avulla laskea kullekin puulle läpimitta, runkoluku, ikä, kehitysluokka, pohjapinta-ala sekä tilavuus. Koealoille ja kuvioille voidaan vastaavasti laskea kyseiset tiedot puulajiluokittain. Keksinnössä on myös esitetty, miten vanhaa puustotietoa ja tietämystä (tietämyspohjaisia järjestelmiä) voidaan käyttää parantamaan estimoitavien puustotunnusten tarkkuutta.

20

Tässä keksinnössä esitetty menetelmä on tarkin kaikista tähänastisista metsien inventoinnin kaukohavainnointimenetelmistä. Keksinnön etuna tyypillisiin kaukohavainnointimenetelmiin nähden on myös se, että keksinnön menetelmällä mitataan kohteesta selviä fysikaalisia tunnuksia etäisyysdatan muodossa, joille voidaan johtaa yleisesti tunnettujen yhtälöiden avulla puun tunnuksia, kuten tilavuus. Näin ollen menetelmä ei välttämättä vaadi koealojen käyttöä opetusaineistona, mikä pienentää menetelmästä johtuvia kustannuksia.

25

Hyväresoluutioisen kolmiulotteisen kuvan tuottaminen on edellytys menetelmän käytölle. Mittauksien tiheys (peräkkäisten ja vierekkäisten pulssien/näytteiden etäisyys maanpinnalla) vaikuttaa voimakkaasti siihen, mitä laserin tuottamasta aineistosta on mahdollista määrittää. Keksinnössä on oivallettu hyödyntää lasertutkien kasvanut pulssitoistotaajuus menetelmässä, joka perustuu enemmän

30

hahmontunnistukseen (saadaan useita osumia kohteeseen neliömetriä kohden, jolloin useiden kohteiden piirteet alkavat näkyä) kuin nykyisen tekniikan tason mukaiseen puhtaasti tilastolliseen laskentaan. Pulssimäärän kasvattaminen keksinnön mukaisen menetelmän tavoin tuo merkittävää lisäetua metsien inventointiin. Suuri näytteiden määrä mahdollistaa hyvän erotuskyvyn ja tällöin on mahdollista määrittää yksittäisen puun ominaisuuksia. Aiemmin laserdatan avulla ei ole tuotettu kuvia, joista on pystytty erottamaan ja johtamaan tarkasti yksittäisten puiden todelliset ominaisuudet, joista mm. tilavuus voidaan laskea.

- 10 Keksinnön mukainen menetelmä pystyy yleisesti ottaen tuottamaan puuston tilavuusestimaatteja pienemmällä kuin 15 % virheellä kuviotasolla pohjoisella havumetsävyöhykkeellä. Menetelmä on sovellettavissa myös muuallakin, erityisesti tropiikin istutusmetsissä. Tämä on mahdollistuu siten, että on mahdollista tehdä ylhäältä näkyvästä puustosta puustokartta ja koska kartta on suoraan digitaalisessa muodossa, ja nykyaikana suurin osa metsätiedoista on paikkatietojärjestelmissä, se mahdollistaa jopa yksittäin puun alueen seuraamisen ja toimenpiteiden päivittämisen, mikä esimerkiksi puisto- ja arvoalueilla voi olla tarpeen. Menetelmän kustannustehokkuutta nostaa jatkuva laserkeilaimien ja tutkatekniikan kehittyminen. Menetelmän automatisointi (kerätyn aineiston prosessointi tietokoneella) on myös mahdollista.

Seuraavassa keksintö esitetään yksityiskohtaisesti kuvioiden ja esimerkkien avulla, joita ei ole tarkoitettu keksinnön rajoittamiseksi millään tavalla.

25

KUVIOT

Kuvio 1 on yleiskuva keksinnön mukaisen menetelmän mittaustilanteesta.

Kuvio 2 esittää laserkeilaimen avulla saatavaa näytteenottotiheyttä metsäisestä kohteesta.

30

Kuvio 3 esittää näytteiden määrän ja erotuskyvyn välistä yhteyttä metsäisellä alueella.

Kuvio 4 on todellisella laserkeilaindatalla laskettu minimipinta metsäalueelle (kunkin pikselin sisälle kuuluvista pisteistä on valittu z-arvoltaan pienin). Pikselikoko 50 cm, koko alue 125 m x 125 m. Puuttuvat arvot koodattu 150:ksi.

5 Kuvio 5 on todellisella laserkeilaindatalla laskettu maksimipinta metsäalueelle (kunkin pikselin sisälle kuuluvista pisteistä on valittu z-arvoltaan suurin). Puuttuvat arvot koodattu 0:ksi.

Kuvio 6 on kuvioden 4 ja 5 datalle laskettu maastomalli. Maastomalli kuvaa suoraan maaston korkeutta kyseisessä pisteessä meren pintaan nähden.

10 Kuvio 7 on kuvioden 4 ja 5 datalla laskettu puuston pituusmalli. Pituus pituusmallista pystytään todellakin erottamaan yksittäisiä puita ja puurykelmiä. Kuvan erotuskyky on 0.5 m.

Kuvio 8 on esimerkki segmentoiduista latvuksista. Segmentoinnilla määritetään latvuston reunat.

15 Kuvio 9 on esimerkki yksittäisten puiden pituuden mittaustarkkuudesta keksinnön osoittamalla tavalla.

Kuviot 1-3 ovat karkeita kuvioita mittaustapahtuman selkeyttämiseksi. Kuvio 8 on karkea kuvio latvusten ääriviivojen määrittämisestä.

20

KEKSINNÖN YKSITYISKOHTAINEN KUVAUS

Hyväresoluutioisen kolmiulotteisen mittauksen tekeminen puustoalueelta

25 Keksinnössä tutkalaite, jota käytetään mittauksissa, voi olla joko leveän keilan muodostama laserkeilain tai radiotaajuinen keilaava tutka, jotka ovat toiminnaltaan samanlaisia. Tärkeintä on tuottaa tutkaperiaatteella hyväresoluutioista kolmiulotteista tietoa metsästä, josta yksi puun tai puuryhmin puustotunnusten määrittäminen tehdään.

30

Mikäli laserkeilaimen synnyttämän keilan leveys on luokkaa 1 m, laite voi rekisteröidä saman pulssin sisällä puuston aiheuttaman kaiun. Samasta kaiusta voi tällöin määrittää sekä maanpinnan ja latvan etäisyyden tutkasta. Keilaavalla

radiotaajuustutkalla tilanne on samanlainen. Ero kapean keilan muodostavaan laserkeilaimen on tällöin vain, se, että myös maakailulle saadaan useammin mittaustieto, eli signaalin tunkeutumiskyky puuston lävitse on parempi. Tällaisilla laitteilla on siten helpompi määrittää luotettavasti maastomalli. Kapean keilan muodostava laserkeilain edustaa tällä hetkellä olevaa potentiaalista instrumenttia puuston pituusmallin määrittämiseen, joten jatkossa keskitytään kuvaamaan, miten sillä saadaan puuston pituusmalli tuotettua ja miten sen aineistoa voidaan hyödyntää metsien inventoinnissa. Vaikka jatkossa siis puhutaan laserkeilaimesta (kapean keilan muodostavasta), keksintö kattaa myös yleisellä tasolla periaatteet, miten leveän keilan muodostavat laserkeilaimet ja radiotaajuiset keilaavat tutkat toimivat metsäolosuhteissa. Jälkimmäisillä on vain mahdollisuus tuottaa raakatuloksena kolmiulotteista tilavuusmallia kuin edellinen tuottaa kolmiulotteista pintamallia.

Kuviossa 1 on esitetty yleiskuva keksinnön mukaisen menetelmän mittaustilanteesta. Mittaus tehdään lentävästä aluksesta 1 (lentokone, helikopteri, miehittämätön lentoalus, lennokki) puuston yläpuolelta. Näistä lentokone on tällä hetkellä tasaisilla alueiden paras alusta, helikopteri vuoristoisilla alueilla ja kustannuksiltaan edullisin on automaattiohjattu miehittämätön lentoalus tai lennokki. Laserlaite 2 koostuu keilainosasta, joka aiheuttaa lentosuuntaa vastaisen poikkeutuksen, lasertykistä, joka tuottaa laserpulssit 3, ja ilmaisinosasta, joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden kohteeseen. Kuvion 1 lentokoneessa 1 olevan laser-keilaimen lasertykin lähettämä laserpulssi 3 osuu kohteeseen ja palaa takaisin ilmaisimelle, jolloin voidaan määrittää kohteen ja laserin välinen etäisyys pulssin kulkuajan perusteella. Kun lasertykin asento ja paikka ovat tarkasti tunnetut, mitattu etäisyys lasertykin ja kohteen 4 tässä tapuksessa puun) välillä voidaan muuttaa korkeudeksi; tähän perustuu koko laserin avulla tapahtuvan pintamallin mittaaminen. Laserlaitteen 2 asento ja sijainti määritetään tyypillisesti inertiajärjestelmän ja GPS-mittauksen avulla (Global Positioning System, maailmanlaajuinen satelliittiverkosto paikantamiseen). Inertiajärjestelmä mittaa joko pelkkää asentoa tai asentoa ja paikkaa inertia-antureita käyttäen. Laserkeilain tekniikan yhteydessä puhutaan yleensä lyhenteestä INS, joka on täydellinen 6-ulotteinen mittaajärjestelmä (sekä asento ja paikka). Laserkeilaintekniikan GPS-mittauksessa on yksi GPS-vastaanotin 5, joka on samassa lentävässä alustassa kuin laserkeilain ja maassa on toinen GPS-

vastaanotin referenssiasemana 6 tutkittavan alueen lähietäisyydessä, esimerkiksi 30 km säteellä.

5 Koska laser ja radiotaajuustutkat ovat *aktiivisia* mittalaitteita (lähettävät signaalia, jonka vastaanotetaan kohteesta heijastuttuaan), voidaan mittauksia tehdä myös yöllä.

10 Kuvan tuottaminen tapahtuu keilaimen avulla, joka pyyhkäisee laser-pulssia lentosuuntaa vastaan kohtisuoraan. Toisessa suunnassa kuva muodostuu lentävän alustan siirtyessä pitkin lentolinjaa. Tällä tavalla katetaan koko kohteen ala. Lasertykin ja keilaimen ominaisuuksista (pulssitoistotaajuudesta, rinnakkaisten pulssien määrästä, keilaimen maksimaalisesta keilauskulmasta ja keilaustavasta), lentokorkeudesta ja lentonopeudesta riippuen määräytyvät mm. maanpintaan
15 vierekkäisten keilojen (keilan halkaisija tyypillisesti muutama kymmen senttimetriä) etäisyydet. Keilausmekanismeja on useita. Kartiokeilauksessa mittauskulma kohteeseen pysyy koko ajan vakiona. Nk. pushbroom-keilauksessa rinnakkaisten keilojen orientaation toisiinsa nähden on aina vakio.

20 Kuviossa 2 on esitetty tulostukuvio siitä, miten yksittäisillä keiloilla 3 peitetään mitattava alue mittauspisteiden 7 avulla. Mitattujen pisteiden 7 sijainnit muodostavat kuviossa 2 säännöllisen kuvion lentotietä pitkin. Viitenumero 8 esittää puiden latvuksen peittämän alueen.

25 Metsien mittaamisen kannalta tärkeätä on tehdä mittaukset mahdollisimman kohtisuoraan, jotta katvealueita ei syntyisi puiden taakse. Mittauskulma tulee olla mielellään pienempi kuin 10 astetta vertikaalista. Koemittauksissa on havaittu katvealueiden syntyvän jopa yli 5 asteen mittauskulmilla. Keksinnön idean mukaisesti menetelmässä tulee käyttää sellaista laserlaitetta, jolla voidaan lähettää riittävä määrä laserpulsseja/näytteitä yksittäisten puiden tai puuryhmien
30 erottamiseksi toisistaan. Näytteiden määrään vaikuttaa tietenkin haluttu tarkkuus, jolla puustoa halutaan mitata, ja puiden latvuston koko. Useimmissa tapauksissa näytteitä kannattaa kerätä useita neliometriä kohden ja näytemäärän kasvattaminen kymmeneen tai jopa kymmeneen tuo selkeä tarkkuusparannusta ainakin pohjoisessa

havumetsävyöhykkeessä. Pulssi/näytemäärän optimointi on optimointia tarkkuuden ja kustannusten välillä. Riippuen edellä mainituista parametreista on vaikea antaa ohjearvoa tarvittavalle pulssintoistotaajuudelle, mutta alarajana voidaan pitää 50 kHz, yksittäiset puut näkyvät todella hyvin mikäli vastaava arvo on noin 200 kHz.

5 Tällä hetkellä on olemassa vain muutama laite, jotka täyttää nämä vaatimukset. Esimerkiksi TopoSys-1 laserkeilaimen pulssintoistotaajuus on 80 kHz, mittaustiheys nimelliseltä 800 m korkeudelta on 3-4 pulssia neliometriä kohden, ja mittaustarkkus x- ja y-suunnassa on parempi kuin 1 m ja tasaisilla alueilla z-suuntainen tarkkuus on parempi kuin 15 cm. Tyypillinen pulssintoistotaajuus muilla laitteilla on n. 10 kHz,

10 mutta laitteistot kehittyvät koko ajan.

Metsämittauksiin vaikuttaa myös vuodenaika. Talviaikaan (lunta maassa) lasermittauksia ei kannata suorittaa, koska lumi saattaa heijastaa pulssin pois päin laserin ilmaisinosasta. Optimaalinen aika on silloin, kun latvustossa on tarpeeksi

15 neulasia ja lehtiä heijastaakseen laserin signaalin latvasta ja maan pinnassa ei ole runsasta aluskasvillisuutta. Mittaukset Suomen olosuhteissa ovat kuitenkin osoittaneet, että hyvälaatuista puustotietoa voidaan tuottaa myös loppukesästä/alkusyksystä. Radiotaajuisilla tutkilla mittauksia voidaan suorittaa kaikkina vuoden aikoina. Mikäli taajuus on kuitenkin pienempi kuin 5 GHz,

20 lehdettömien lehtipuiden pituus tulee aliarvioitua.

Koska mittaukset tulee tehdä pienillä mittauskulmilla (vertikaaliin nähden), on mitattavan alueen leveys kapea (800 m lentokorkeudelta 282 metriä leveä olettaen 10 astetta maksimaaliseksi poikkeutukseksi), minkä vuoksi sovelluksesta riippuen

25 voidaan joutua lentämään useita rinnakkaisia linjoja koko alueen kattamiseksi.

Keksinnön edullisissa suoritustavoissa eri mallien luomisessa käytetään hyväksi eri laserjärjestelmissä käytettäviä erilaisia tallennustapoja. Tyypillisesti jokaisessa järjestelmässä on sekä ensimmäisen ja jälkimmäisen kaiun tallennustavat (engl. *first pulse mode* ja *last pulse mode*).

30 Ensimmäisen kaiun tallennustapa ilmaisee laseria lähimpänä olevien kohteiden etäisyyden ja jälkimmäisen kaiun tallennustapa pyrkii näkemään esimerkiksi metsäisessä kohteessa maanpinnan. Keksinnössä havaittiin, että koska molemmat tallennustavat sisältävät tietoa sekä puuston latvaosista että

- maanpinnasta, saadaan paras tulos, mikäli mittaustulokset yhdistetään. Samalla voidaan kasvattaa käytettävissä olevien näytteiden määrää. Tulevaisuudessa voi olla myös mahdollista, että näiden tallennustapojen lisäksi tai sijasta tallennetaan koko profiili, kuten ei-keilaavilla järjestelmillä on aikaisemmin tehty (J. Hyyppä, M. Hallikainen, 1993, "A helicopter-borne 8-channel ranging scatterometer for remote sensing, Part II: Forest Inventory", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31:170-179. Tämä kuitenkin edellyttää huomattavaa datan talletus-
- 5 kapasiteettia.
- 10 Tällä tavoin koko alue tulee katettua pienillä keiloilla, joille voidaan määrittää koordinaatit. GPS-järjestelmästä johtuen mittauspisteet ovat WGS-84-järjestelmässä (lisätietoja kirjasta *GPS-paikanmääritys* (Markku Poutanen 1998)) ja ne pitää muuntaa kohteelle haluttuun koordinaattijärjestelmään ja projektioon (kuten ykj ja kkj) käyttäen olemassa olevia konversiofunktioita. Kunkin maan kartoitus- ja
- 15 maanmittausorganisaatiot ovat kykeneviä toimittamaan tarvittavat konversiotiedot. Tuloksena syntyy maastopistetiedosto, joka käsittää yksittäisiä x-,y- ja z-koordinaatteja määritettynä paikalliseen koordinaatti- ja projektiojärjestelmään. Koordinaatistojen ja projektioiden määrittämisestä voi lukea teoksesta *Käytännön geodesia* (Martti Tikka 1985).

20

Kolmiulotteisen puuston pituusmallin laskeminen mitatusta aineistosta

- Pistetiedostoa analysoimalla voidaan tuottaa erilaisia *pintamalleja*. Seuraavassa on esitetty määritelmät erilaisille malleille, koska useimmille niistä ei ole virallista
- 25 määritelmää.

- Pisteet, jotka ovat heijastuneesta maasta, synnyttävät *maastomallin*. Laserkeilaimen tuottamaa dataa ennen prosessointia kutsutaan yleensä *pintamalliksi* (DSM, digital surface model), josta voidaan sitten prosessoinnilla tuottaa maastomalli tai
- 30 *korkeusmalli* (DTM, digital terrain model ja DEM, digital elevation model). Valitsemalla pisteet, jotka ovat heijastuneet kasvillisuuden korkeimmista kohdista, saadaan *kasvillisuusmalli*, jota voi kutsua myös metsäisillä alueilla *latvamalliksi*. Keksinnön mukaan on havaittu, että mittaamalla puustosta etäisyystietoa riittävällä

määrällä mittauspisteitä on mahdollista laskea *pituusmalli*, jossa on huomioitu maaston vaihtelevuus, ja josta siten voidaan johtaa puiden todellinen pituus toisin kuin latvamallissa, joissa ilmenee ainoastaan puiden korkeus tiettyyn referenssipintaan nähden. *Pituusmalli* voidaan esim. laskea latvamallin ja maastomallin/korkeusmallin erotuksesta, joka on siis metsäisillä alueilla 3-ulotteinen esitys siellä esiintyvän puuston pituudesta. Mallit esitetään joko hajapisteinä tai säännöllisenä ruutuverkkona.

Keksintö hyödyntää juuri tämän puuston pituusmallin käyttöä puuston inventoinnissa.

Seuraavassa kuvataan esimerkki eräästä toimivasta ratkaisusta.

Laskettaessa latvamallia, maastomallia tai puuston pituusmallia kannattaa toimia seuraavien periaatteiden mukaisesti. Muunnetaan mitatut pisteet halutulle ruudukolle (määritetään yksittäisen ruudun (jatkossa kutsutaan pikseliksi) koko ja alueen koko), kts. kuvio 3. Muunnettaessa pisteitä ruudukkoon tulee muistaa, että muunnos saattaa aiheuttaa virheitä, varsinkin jos näytteitä ei ole tarpeeksi kutakin ruutua kohden. Keksinnössä on havaittu, että haluttaessa inventoida puita yksitellen tai pieninä ryhminä tulee pikselikoon olla esimerkiksi 1 m tai mielellään 0.5 m, jolloin latvuksen leveyden määrittäminen luotettavasti on mahdollista. 0.5 m pikselikoko/erotuskyky vaatii näytteitä runsas kymmenkunta neliömetriä kohden. Yksinkertainen tapa aloittaa maastomallin ja latvamallin laskeminen on valita kuhunkin pikseliin tulevista z-arvoista minimi ja maksimi. Saadaan kaksi pintaa, joista toinen kuvaa maastomallin maksimiarvoja (*maksimipinta*) ja toinen minimiarvoja (*minimipinta*). Maksimiarvot kuvaavat hyvin latvuston ylimpiä osia ja aukeilla alueilla maaston pintaa. Minimiarvot kuvaavat maaston korkeusmallia, mutta joukossa on mm. puiden latvoja. Minimisuodattimen avulla voidaan minimiarvoista laskea nk. karkea maaston korkeusmalli. Suodattimen ikkunan koko tulee olla suurempi kuin yksittäisten latvojen halkaisija. Keksinnössä havaittiin, että hyvä oletusarvo minimisuodattimen koolle on Suomessa 8 m runsaspuustoisilla alueilla. Minimisuodatuksen jälkeen tätä nk. karkeaa maaston korkeusmallia verrataan alkuperäisien hajapisteiden koordinaatteihin. Pisteet, jotka poikkeavat tästä minimisuodatetusta pinnasta tietyn määrän D, esimerkiksi 1 metrin verran maksimissaan, luokitellaan maasta aiheutuneiksi pisteiksi. Näiden pisteiden avulla

interpoloidaan puuttuvien alueiden maaston pinta esimerkiksi Delaunayn kolmioinnin avulla. Syntynyttä maaston korkeusmallia voidaan parantaa iteraation avulla seuraavasti: olettamalla tämä pinta uudeksi referenssiksi ja verrattuna alkuperäisiin hajapisteisiin valitaan uudet maasta aiheutuneet pikselit, jolle operaatio toistetaan.

- 5 Toistoa voidaan jatkaa, kunnes korvautuneiden pisteiden määrä on vähäinen ja laatu on tyydyttävä. Toinen mahdollinen menetelmä maastomallin määrittämiseen on esitetty julkaisussa (K. Kraus, N. Pfeiffere, 1998 "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53: 1993:203).

10

Mikäli laserdatassa on reikiä tai yksittäisiä poikkeavia pisteitä, voidaan ne korvata interpoloimalla sille uusi arvo viereisten pisteiden avulla. Yksittäisten poikkeavien pikselien tunnistamiseen voidaan laskea jokaiselle pikselille mm. gradientti. Poikkeavat arvot voidaan näin poistaa.

15

Kuviossa 4 on esitetty laserdatasta laskettu minimipinta, jossa kunkin pikselin sisälle kuuluvista pisteistä on valittu z-arvoltaan pienin. Vastaava maksimipinta on esitetty kuviossa 5. Molempien kuvien pikselikoko on 50 cm ja kuva kattaa 125 m. Kuviossa 6 on esitetty edellä kuvatulla periaatteella ($D = 1\text{m}$), ilman iteraatiokierroksia ja
20 delaunayn kolmioinnilla tehty maastomalli. Kuviossa 7 on esitetty vastaava puuston pituusmalli kyseisellä alueella.

Puustotunnusten määrittäminen puuston pituusmallista

- 25 Keksinnössä on havaittu ensimmäistä kertaa maailmassa, että hyväresoluutioisesta puuston pituusmallista saadaan määritettyä seuraavat yksittäisen puun tunnukset ylhäältä näkyville puille: puun pituus, puun sijainti, latvuksen läpimitta, rungon läpimitta esim. 1.3 metrin korkeudelta, kehitysluokka, ikä, runkotilavuus, pohjapinta-ala ja puulaji. Isommalle puurykelmälle voidaan lisäksi määrittää näiden tunnusten ja
30 näiden tilastollisen tiedon lisäksi ylhäältä näkyvän puuston runkoluku ja latvuspeittoprosentti, joita molempia voidaan käyttää koealojen ja kuvioiden tunnuslukujen estimoinnissa. Aikaisemmissa tutkimuksissa ei ole pystytty hyödyntämään laserin avulla latvuspeittoprosenttiin liittyviä suuria

profiilimittauksissa; myös tältä osin keksintö tuo merkittävää uutta nykyiseen tietämykseen. Näiden tietojen avulla voidaan sitten määrittää puuston ominaisuuden halutulta alueelta.

- 5 Seuraavassa esitetään esimerkki eräästä tavasta näiden tunnusten laskemiseksi.

Laskennan ja estimoinnin lisäksi menetelmä voi hyödyntää olemassa olevaa tietämystä, mikä parantaa estimaattien luotettavuutta merkittävästi. Myös tältä osin keksintö on ainutlaatuinen.

10

Puun rajaaman alueen sisältä saatujen näytepisteiden avulla määritetään joko kaksiulotteisesti (poikkileikkaus) tai kolmiulotteisesti puun geometria ja/tai puun hahmo joko puulajin tunnistamiseksi tai puuston mallintamiseksi.

- 15 Puustotunnusten laskeminen puuston pituusmallista tapahtuu seuraavasti. Määritetään yksittäisten puiden sijainti ja latvuston äärireunat perinteisillä hahmontunnistuksenmenetelmillä. Yleisesti puiden sijaintien määrittäminen perustuu paikallisten maksimien etsimiseen. Paikallisen maksimin löytämiseksi laserilla tuotettua pituusmallia suodatetaan alipäästäsuodattimella. Suodatuksen määrään vaikuttaa
20 käytetty puuston pituusmallin pikselikoko ja aineiston lasernäytteiden lukumäärä neliömetriä kohden. Tyypillisesti yksi suodatuskertaa on riittävä. Ilman suodatusta saattaa kuvalta löytyä samastakin latvuksesta useita paikallisia maksimeja. Latvuksen koon tai sen äärireunojen määrittämiseen löytyy useita asiaan soveltuvia algoritmeja hahmontunnistuksen alalta. Latvuksien äärirajojen etsimisessä (tai puun
25 latvusta vastaavan alueen määrittämisessä, segmentoinnissa) parametrit tulee valita siten, että kaksi erillistä puuta ei tule yhdistettyä yhdeksi latvaksi, mikäli vain mahdollista. Parametrien valinta soveltumaan käytössä olevalle puustotyyppille tulee tehdä manuaalisesti. Kuvio 8 on esimerkki automaattisen hahmontunnistusmenetelmän tuottamasta latvuksen rajoista.

30

Latvuksen keskimääräinen leveys L lasketaan latvuksen peittämän pinta-alan A avulla.

$$L = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1)$$

Puun pituudeksi h oletetaan latvuksen sisältä löytyvä puuston pituusmallin maksimipiste (puun korkein kohta).

5

$$h = \max(h_i) \quad (2)$$

missä h_i ovat yksittäisiä puuston pituusmallin antamia pituuksia latvuksen pinta-alan A sisällä. Keksinnössä on selvitetty koemittauksin, että yksittäisten puiden ja valtapuiden pituus voidaan määrittää 1 m keskivirheellä, kuvio 9. Vertailuaineistona oli hypsometrillä tehdyt maastomittaukset 89 puulle. Mittauksen harha oli 14 cm, mikä on erittäin hyvä tulos. Selityssaste on 0.97.

10

Puun sijainti määritetään maksimipistettä vastaavan x- ja y-koordinaattitiedon avulla.

15

Pohjoisella havumetsäalueella puiden latvuksen keskimääräisellä leveydellä L on selkeä yhteys puun läpimittaan d

$$d = \alpha L + \beta \quad (3)$$

20

missä kertoimet α ja β kalibroidaan mieluiten paikallisen maastoaineiston avulla. Kertoimet tulee määrittää kullekin puulajille (mänty, kuusi, koivu, muu lehtipuu) erikseen, mikäli järjestelmä hyödyntää puulajitiedon.

25

Koska laserkeilain tuottaa myös pituustiedon ja koska läpimitalla ja pituudella on selkeä yhteys, voidaan puulle mitattua pituutta käyttää myös estimoinnissa. Käytettäessä lineaarista regressiota puun läpimitan malli on muotoa.

$$d = \alpha L + \beta h + \gamma \quad (4)$$

30

missä kertoimet α , β ja γ kalibroidaan mieluiten paikallisen maastoaineiston avulla. Pituuden ja läpimitan suhde ei ole aivan lineaarinen, sillä läpimitan kasvaessa riittävän suureksi käyrän kulmakerroin pienenee läpimitan kasvaessa. Lisäksi myös läpimitan kasvaessa pituuden hajonta kasvaa. Tarkempaa pituusmallia laadittaessa on siis ensin linearisoitava pituuden ja läpimitan välinen riippuvuus sekä vakioitava pituuden varianssi läpimitan suhteen. Näslund (1936) (M. Näslund, 1936, "Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog", *Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt* 28 (1) kuvasi pituuden ja rinnaskorkeusläpimitan (läpimitta 1.3 m korkeudelta) riippuvuuden yhtälöä seuraavasti

$$h = \frac{d^2}{(\alpha_1 + \alpha_2 d)^2} + 1.3 \quad (5)$$

Käyttämällä epälineaarista muunnosta voidaan mallia (4) parantaa. Myös valtakunnallisten käyrien käyttäminen on mahdollista. Suomen osalta vastaavat käyrät löytyvät viitteestä (J. Laasasenaho, 1982, "Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch", *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108, 74 s).

Latvuksen läpimitan ja sitä kautta yksittäisen puun läpimitan määrittämisen mahdollisia virhetekijöitä on se, että useita latvuksia tulee tulkittua kuuluvan samaan puuhun, jolloin latvuksen peittämä pinta-ala ja saatu läpimitta ovat runsaasti oikeita arvoja suurempia. Saatu latvuksen läpimitta L tuleekin tarkistaa esimerkiksi kaavan (3) avulla, josta saadaan karkea arvio rungon läpimitalle d . Mikäli käytössä on tilastotietoa siitä, mikä on todennäköisyys kullakin pituus- ja läpimittayhdistelmällä, voidaan poistaa useimmat virheellisesti määritetyt latvuspinta-alat. Esimerkiksi mikäli esiintymistodennäköisyys on alle 1%, on todennäköistä, että puun latvuksen keskimääräinen leveys on määritetty väärin. Samaten olemassa olevaa tietämystä puun latvuksen keskileveydestä tulee käyttää. Esimerkiksi puiden latvuston leveys on harvoin yli 8 m. Tällaiset tietämykseen perustuvat säännöt eivät ole välttämättömyys, mutta parantavat laskettujen puustotunnusten estimaatteja. Koska laseraineistosta pystytään määrittämään sekä yksittäisen puun pituus ja latvuksen keskiläpimitan avulla rungon läpimitta, voidaan tietämykseen ja tilastotietoon

perustuvilla malleilla huomattavasti parantaa tilavuusestimaattien luotettavuutta, mikä tekee keksinnöstä osaltaan ainutlaatuisen kaukokartoitusmenetelmän maailmassa. Ilma- tai videokuviin perustuvat menetelmät pystyvät määrittämään vain latvuston keskiläpimitan. Ilman muuta mitattavaa suuretta vastaavia tarkistuksia ei voida toteuttaa näillä aineistoilla. Ja koska yksittäisen puun tilavuus määritetään perinteisesti tarkemmin pituuden ja läpimitan avulla kuin pelkän läpimitan avulla, on keilaavan laserin avulla mahdollisuus tuottaa huomattavasti tarkempia tilavuusestimaatteja kuin ilmakuvien tai videokuvien avulla. Alustavat tulokset viittaavat myös parempaan tarkkuuteen kuin perinteissä kuvioittaisessa inventoinnissa saavutetaan.

Tietämystä voidaan käyttää estimoimaan valtajakson alle jäävän puuston osuuden määrää, sillä laserkeilain tuottaa pituusmallia vain ylhäältä nähtävissä olevasta puustosta. Niinpä puustotunnukset saadaan määritettyä vain metsikössä esiintyvälle näkyvälle jaksolle. Mikäli on olemassa tietämystä puuston todennäköisestä pituusjakauma/läpimitta-jakaumasta, voidaan laserkeilain tuloksia parantaa käyttämällä näitä jakaumia hyväksi. Weibull-jakaumasta on tullut yleisimmin käytetty funktio kuvaamaan läpimittajakaumaa. Suomessa Weibull-jakaumaa käytettiin ensimmäisen kerran tutkimuksessa (P. Kilkki, R. Päivinen, 1986, "*Weibull-function in the estimation of the basal area DBH-distributions*", *Silva Fennica*, 20: 149-156.). Weibull-jakauma täyttää läpimittajakaumille tyypillisesti asetetut joustavuusvaatimukset (A. Kangas, J. Kangas, K. Korhonen, M. Maltama, R. Päivinen, 1990, *Metsää kuvaavat mallit*, *Silva Carelica* 17, 143 s.). Beta-jakauma on vielä Weibull-jakaumaa joustavampi, mutta sen laskennallinen käsittely vaatii numerista integrointia skaalauskerroimen määrittämiseksi. Jakaumien käytössä verrataan laserin avulla määritettyä jakaumaan tiedossa olevaan puuston jakaumaan ja puuttuvien puiden osalta lasketaan korjaustekijät kullekin puustotunnukselle. Jakaumien käyttö ei ole välttämätöntä, mutta on suositeltavaa silloin, kun puuston tiedetään olevan varsin tiheää, todellinen jakauma on tiedossa ja pyritään mahdollisimman pieneen systemaattiseen virheeseen, sillä ilman korjausta laserkeilainaineisto tuottaa aliarviota puuston runkotilavuudesta.

Läpimitan ja pituuden avulla voidaan määrittää puun kehitysluokka ja estimoida puun ikä.

Yksittäisen puun pohjapinta-ala g (m^2/ha) saadaan kaavasta

$$g = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (6)$$

Runkoluku voidaan määrittää yksinkertaisesti kuvasta määritettyjen latvuksen lukumääränä.

Latvuspeittoprosentti voidaan määrittää latvuksien peittämän pinta-alan suhteena koko pinta-alaan. Latvuspeittoprosentti voidaan määrittää myös siten, että lasketaan puihin osuvien laserpulssien lukumäärä suhteessa koko pulssimäärään halutulla alueella.

Puulajin määrittämiseen on kaksi käyttökelpoista menetelmää. Julkaisussa J. Hyyppä, Hyyppä, H., Samberg, A., 1999, Assessing Forest Stand Attributes by Laser Scanner, *Laser Radar Technology and Applications IV*, Proceedings of SPIE, 3707: 57-69 on esitetty laserkeilaimella tuotettu poikkileikkauskuva metsästä. Kartiomaiset kuusikot erottuvat helposti männiköistä ja koivikoista. Analysointi voidaan tehdä myös 3-ulotteisesti, jolloin yhden puun rajaaman alueen sisältä saatujen näytepisteiden avulla määritetään puun geometria ja puun hahmo, jonka avulla se pyritään tunnistamaan. Ilmakuvaus on verraten halpa media, joten ilmakuva yhdistettynä laserkeilainkuvaan antaa paremman tiedon puulajista. Tällöin ilmakuva voidaan vielä orto-oikaista laserilla määritetyn puuston pituusmallin avulla (esim. suodatettu pituusmalli), mikä on myös uutta maailmassa. Tällöin saadaan puuston pituusmallissa ja ilmakuvassa olevat latvuksen saatua päällekkäin. Ilmakuvassa (väärävärakuva) lehtipuut erottuvat helposti männiköistä ja kuusikoista, joiden välilläkin esiintyy selkeä väriero. Mikäli laserlaite tuottaa intensiteettitietoa sironneesta tehosta, siitä on käyttöä tehokkuutta puulajien luokitteluun.

Yksittäisen puun tilavuuden estimointi tapahtuu edellä arvioitujen parametrien avulla. Käytettävissä on kolme eri vaihtoehtoa: 1) tilavuuden estimointi pelkän puuston pituuden avulla, 2) tilavuuden estimointi puuston pituuden ja määritetyn läpimitan avulla ja 3) tilavuuden estimointi pituuden, läpimitan ja puulajin avulla. Laasasenaho
 5 (1982) (J. Laasasenaho, 1982, "*Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch*", *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108, 74 s.) on esittänyt funktiot, miten pituuden ja läpimitan avulla voidaan laskea yksittäisen puun tilavuus kullekin puulajille seuraavasti:

10 männylle $v = 0.036089 d^{2.01395} (0.99676)^d h^{2.07025} (h - 1.3)^{-1.07209}$ (7)

kuuselle $v = 0.022927 d^{1.91505} (0.99146)^d h^{2.82541} (h - 1.3)^{-1.53547}$ (8)

15 koivulle $v = 0.011197 d^{2.10253} (0.98600)^d h^{3.98519} (h - 1.3)^{-2.65900}$ (9)

Mallien keskivirheet ovat noin 7-8,5 %.

Koealaa tai kuviota vastaavat puustotunnukset saadaan määritettyä laskemalla vastaavat tunnukset käyttäen kaikkia yksittäisen puun tunnuksia halutulla alueella.
 20 Esimerkiksi kuviota vastaa tilavuus per hehtaari voidaan laskea summaamalla kaikkien yksittäisten puiden tilavuuden kyseisen kuvion sisältä ja jakamalla tilavuus kuvion koolla. Aikaisemmin esitetyllä jakaumaperiaattella voidaan parantaa estimaattien tarkkuutta näkymättömän puuston osan osalta. Tällöin tosin tulee muistaa, että puuston tilastollisesta jakaumasta on oltava tietoa. Keskipituus
 25 saadaan joko aritmeettisena keskiarvona yksittäisten puiden pituuksille. Yleensä metsien inventoinnissa on tapana laskea painotettu keskipituus, jossa painokertoimena on kunkin yksittäisen puun pohjapinta-ala. Pohjapinta-ala hehtaaria kohden saadaan summaamalla kaikkien puiden pohjapinta-alat ja jakamalla se kuvion koolla.

30 Menetelmän yksinkertaistettu tapa tuottaa tilavuusinformaatio on arvioida latvuksien koon perusteella latvuspeittoprosentti, pohjapinta-ala tai vastaava tiheyssuure ja

puuston keskipituuden (määritetty puuston keskipituusmallin avulla) määrittää puuston tilavuus Ilvessalon relaskooppitaulukkojen tapaan (Tapion Taskukirja 1978).

5 Useimmat metsät on jo useampaan kertaa inventoituja. Esitetyn menetelmän tuloksia parantaa vanhan inventointitiedon käyttö olettaen, että vanha inventointitieto on luotettavaa. Vanhaa inventointitietoa tulee käyttää siten, että vältetään virheet, jotka ovat todellisuudessa mahdottomia. Esimerkiksi kuvio, joka 10 vuotta sitten oli tilavuudeltaan 5 m³/ha ei voi olla nyt tilavuudeltaan 200 m³/ha.

10 Tehdyt koetyöt ovat osoittaneet, että kehitetty menetelmä on tarkkuudeltaan vertailukelpoinen ja jopa parempi kuin perinteisesti käytetyt operatiiviset inventointimenetelmät.

15 Menetelmä soveltuu yksittäisten puiden, puuryppäiden, koealojen, kuvioiden ja laajempien alueiden inventointiin. Seuraavassa on esitetty menetelmän soveltuvuutta kuvioittaiseen arviointiin ja valtakunnan metsien arviointiin, jotka ovat kaksi taloudellisesti tärkeintä inventointitapaa Suomessa.

20 Kuvioittaiseen arviointiin menetelmä soveltuu erinomaisesti erityisesti, jos se yhdistetään vanhaan jo kerättyyn kuvioaineistoon. Tällöin laserin avulla lasketut puustotunnukset voidaan yhdistää muihin alueelta tarvittaviin tietoihin, kuten kasvupaikkatietoihin, jotka eivät ajan kanssa muutu kovinkaan paljoa. Laserin avulla määritettyä maastomallia voidaan käyttää myös avainbiotooppialueiden kartoittamisessa.

25

Valtakunnan metsien inventointi on esitetylle menetelmälle erittäin sovelias sovelluskohde. Laserkeilaimella yleensä tuotetaan kohteesta muutama sata metriä leveä kaistale. Haluttaessa peittää laaja alue joudutaan lentämään useita rinnakkaisia linjoja. Linjojen välisiin kaarroksiin, joissa differentiaali-GPS ei saa kadottaa satelliitteja, kuluu kuitenkin varsin paljon aikaa, mikä nostaa menetelmän kustannuksia. Valtakunnan metsien inventoinnissa laserkeilaimen kaltainen aineisto mahdollistaa sen, että maastotyön määrä vähenee ja laserkeilaimen avulla laskettuja yksittäisten puiden ja koealojen tietoja voidaan käyttää satelliittiaineiston

30

opettamiseen. Valtakunnan metsien inventoinnissa myös lentäminen on tehokasta. Linjat voidaan suunnitella kattavan koko valtakunnan. Menetelmän avulla valtakunnan metsien inventointi on mahdollista automatisoida miltein kokonaan. Metsäntutkimuslaitoksessa on pyritty kehittämään kuvaavan spektrometrin (Aisa) avulla puustotiedon keräämistä ja koealatiedon vähentämistä. Aisalla saadut tulokset ovat kuitenkin merkittävästi huonommat kuin käyttämällä tämän keksinnön menetelmiä.

PATENTTIVAATIMUKSET

1. Menetelmä puustotunnusten määrittämiseksi puuston yläpuolella mittaavan
laitteen avulla,
5 t u n n e t t u siitä, että
a) puustosta kerätään laserkeilaimella kolmiulotteista tietoa käyttämällä
sellaistamäärää näytepisteitä, että yksittäiset puut tai puuryhmät erottuvat
toisistaan,
b) laserkeilaimella kerätyistä tiedoista tuotetaan kolmiulotteinen pituusmalli
10 puuston pituudesta,
c) saadusta pituusmallista määritetään puustotunnuksia, jotka ovat yksittäisten
puiden tai puuryhmien ominaisuuksia ja/tai niiden avulla saatuja laajempien
alueiden puustotietoja.
- 15 2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että
näytepisteiden määrä (pulssintoistotaajuus) valitaan halutun tarkkuuden mukaan.
3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että
kohdassa a) kerätyt tiedot ovat kolmiulotteisia etäisyysmittauksiin perustuvia
20 tietoja.
4. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 3 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että
kolmiulotteinen esitys puuston pituudesta (puuston pituusmalli) saadaan
laskemalla pintamalleista puuston pituusmalli puuston ylimpiä osia vastaavan
25 latvamallin sekä maanpintaa vastaavan maastomallin erotuksesta.
5. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 4 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että
kolmiulotteisen puuston pituusmallin tuottamisessa käytetään hyväksi erilaisia
tallennustapoja ja yhdistämällä näiden mittaustuloksia, jolloin käytettävissä
30 olevien näytepisteiden määrä kasvaa.
6. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että
puun rajaaman alueen sisältä saatujen näytepisteiden avulla määritetään joko

kaksiulotteisesti (poikkileikkaus) tai kolmiulotteisesti puun geometria ja/tai puun hahmo joko puulajin tunnistamiseksi tai puuston mallintamiseksi.

- 5 7. Jonkin patenttivaatimuksen 1 – 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuudet, jotka saadaan pituusmallia analysoimalla ovat puiden sijainti, ikä, pituus, latvuksen läpimitta, rungon läpimitta, pohjapinta-ala, kehitysluokka, puulaji, runkotilavuus ja/tai runkoluku pinta-alayksikköä kohden ja näiden avulla johdettavat tilastolliset tunnuksset.
- 10 8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että yksittäisten puiden sijainti ja latvuksen äärireunat analysoidaan sinänsä tunnetulla hahmontunnistusmenetelmällä.
- 15 9. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puun pituus saadaan määrittämällä sinänsä tunnetulla menetelmällä latvuksen sisältä löytyvä puuston pituusmallin maksimipiste.
- 20 10. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puun rungon läpimitta voidaan johtaa latvuksen keskiläpimitan tai puun pituuden ja latvuksen keskiläpimitan avulla ja mahdollisesti käyttämällä hyväksi tietämykseen perustuvia sääntöjä ja mahdollisesti kullekin puulajille erikseen.
- 25 11. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puun kehitysluokka ja ikä määritetään läpimitan ja pituuden avulla, ja mahdollisesti kullekin puulajille erikseen.
12. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että runkoluku määritetään kuvasta määritettyjen latvuksien lukumääränä.
- 30 13. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että latvuspeittoprosentti määritetään latvuksien peittämän pinta-alan suhteena koko pinta-alaan.

14. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että latvuspeittoprosentti määritetään siten, että lasketaan puihin osuvien laserpulssien lukumäärä suhteessa koko pulssimäärään halutulla alueella.

5 15. Jonkin patenttivaatimuksen 8 - 14 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että isommalle puurykelmälle määritetään yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuuksien ja näiden tilastollisen tiedon lisäksi ylhäältä näkyvän puuston runkoluku ja latvuspeittoprosentti, joita molempia voidaan käyttää koealojen ja kuvioiden tunnuslukujen estimoinnissa.

10

16. Jonkin patenttivaatimuksen 8 - 15 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puuston tilavuus määritetään kokonaan tai osittain puuston keskipituuden ja latvuspeittoprosentin (latvuksien osuus kokonaispinta-alasta)/pohjapinta-alan avulla.

15

17. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 16 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puustotunnusten määrittämiseen käytettyihin tietoihin yhdistetään muista menetelmistä saatuja tietoja, kuten vanhaa inventointitietoa alueelta, ilmakuvia ja satelliittikuvia, laser-keilaimella saatujen tietojen lisäksi.

20

18. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 17 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kolmiulotteisesta puustotiedosta määritetään puun laatuun liittyviä tunnuksia määrittämällä oksattoman rungon pituus.

25

19. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 18 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puustotunnusten määrittäminen laserkeilaimella saadusta tiedosta tapahtuu tietokoneohjelman avulla.

30

20. Tietokoneohjelma puustotunnusten määrittämiseksi tiedoista, jotka on saatu puuston yläpuolella mittaavan laitteen avulla,
t u n n e t t u siitä, että se suorittaa seuraavat vaiheet

- a) kolmiulotteisen puuston pituusmallin tuottaminen puustosta kerätystä kolmiulotteisesta tiedosta puustoalueelta, jossa on käytetty sellaista määrää näytepisteitä, että yksittäiset puut tai puuryhmät erottuvat toisistaan,
- b) puustotunnusten määrittäminen saadusta pituusmallista, jotka
5 puustotunnukset ovat yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuuksia ja/tai niiden avulla saatuja laajempien alueiden tietoja.

21. Patenttivaatimuksen 20 mukainen tietokoneohjelma, t u n n e t t u siitä, että se suorittaa joinkin patenttivaatimuksen 4 -18 mukaisen menetelmän.

PATENTKRAV

1. Förfarande för att definiera kännetecknen på trädbestånd med hjälp av en anordning som mäter ovanom trädbeståndet,
5 k ä n n e t e c k n a t därav att,
 - a) tredimensionell information om trädbeståndet samlas medelst en laseravsökare genom användning av en sådan mängd provpunkter att enskilda träd eller trädgrupper kan särskiljas,
 - b) av data som samlats med hjälp av laseravsökaren produceras en
10 tredimensionell längdmodell av längden på trädbeståndet,
 - c) av den erhållna längdmodellen definieras kännetecknen på trädbeståndet, vilka är egenskaper på individuella träd eller trädgrupper och/eller information om trädbestånd över mera omfattande områden.
- 15 2. Förfarande enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t därav att mängden provpunkter (impulsfrekvensen) väljs efter önskad noggrannhet.
3. Förfarande enligt patentkrav 1 eller 2, k ä n n e t e c k n a t därav att data som samlats i steg a) baserar sig på tredimensionella avståndsmätningar.
20
4. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 3, k ä n n e t e c k n a t därav att man erhåller en tredimensionell framställning över längden på trädbeståndet (en längdmodell av trädbeståndet) genom att från ytmodeller räkna ut längdmodellen på trädbeståndet från skillnaden mellan toppmodellen som svarar mot de översta
25 delarna av trädbeståndet och terrängmodellen som svarar mot markytan.
5. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 4, k ä n n e t e c k n a t därav att man vid produktionen av den tredimensionella längdmodellen av trädbeståndet utnyttjar olika lagringsmetoder och kombinerar mätresultat som erhållits medelst
30 dessa, varvid mängden provpunkter som står till användning ökar.
6. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 5, k ä n n e t e c k n a t därav att man med hjälp av provpunkter som erhållits innanför ett område som begränsas

av trädet definierar trädets geometri antingen tvådimensionellt (tvärsnittet) eller tredimensionellt och/eller gestalten på trädet för att antingen definiera trädslaget eller göra en modell av trädbeståndet.

- 5 7. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 5, k ä n n e t e c k n a t därav att egenskaperna på enskilda träd eller trädgrupper som erhålles genom analysering av längdmodellen är läget, åldern, längden, tvärsnittet på kronan, tvärsnittet på stommen, bottenarean, utvecklingsklassen, trädslaget, stomvolymen och/eller stomantalet per ytenhet och statistiska kännetecken som härleds från dessa.
- 10 8. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t därav att läget på individuella träd och ytterkanterna på kronan analyseras med en i och för sig känd gestalt- identifieringsmetod.
- 15 9. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t därav att längden på trädet erhålles genom att med en i och för sig känd metod definiera maximipunkten av längdmodellen av trädbeståndet, vilken man kan finna innanför kronan.
- 20 10. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t därav att tvärsnittet på trädstommen kan härledas med hjälp av det genomsnittliga tvärsnittet på kronan och/eller trädets längd och det genomsnittliga tvärsnittet på kronan och eventuellt genom att utnyttja regler som baserar sig på kunskap och eventuellt skilt för vart och ett trädslag.
- 25 11. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t därav att trädets utvecklingsklass och ålder definieras med hjälp av tvärsnittet och längden och eventuellt skilt för vart och ett trädslag.
- 30 12. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t därav att stomantalet definieras som antal toppar som definierats från bilden.

13. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 5, k ä n n e t e c k n a t därav att krontäckningsprocenten definieras som förhållandet mellan arean som täcks av kronoma och ytan.
- 5 14. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 5, k ä n n e t e c k n a t därav att krontäckningsprocenten definieras på sådant sätt att antalet laserulser som träffar träden i förhållande till hela pulsmängden räknas inom ett önskat område.
- 10 15. Förfarande enligt något av patentkraven 8 – 14, k ä n n e t e c k n a t därav att för en större trädgrupp definieras utom egenskaper på individuella träd eller trädgrupper och statistisk information dessutom stomantalet och krontäckningsprocenten av trädbeståndet som syns ovanifrån, vilka bägge kan användas vid estimering av kännetecken på provareor och figurer.
- 15 16. Förfarande enligt något av patentkraven 8 – 15, k ä n n e t e c k n a t därav att volymen på trädbeståndet definieras helt eller delvis med hjälp av den genomsnittliga längden och krontäckningsprocenten (andelen toppar av den totala arean)/ bottenarean.
- 20 17. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 16, k ä n n e t e c k n a t därav att man till data som använts för att definiera kännetecken på trädbeståndet förenar information som erhållits med andra metoder, såsom gammal inventeringskunskap från området, luftfotografier och satellitbilder som läggs till data som erhållits med laseravsökaren.
- 25 18. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 17, k ä n n e t e c k n a t därav att man från den tredimensionella informationen om trädbeståndet definierar kännetecken i anslutning till trädslaget genom definiering av längden på den grenfria stommen.
- 30 19. Förfarande enligt något av patentkraven 1 – 18, k ä n n e t e c k n a t därav att definitionen av kännetecknena på trädbeståndet från data som erhållits med laseranordningen sker med hjälp av ett datorprogram.

20. Datorprogram för att definiera kännetecken på trädbestånd från data som erhållits med hjälp av en anordning som mäter ovanom trädbeståndet, k ä n n e t e c k n a t därav att det utför följande steg

- 5 a) producerar en tredimensionell längdmodell av trädbeståndet från tredimensionell information som samlats från området av trädbeståndet, där man använt ett sådant antal provpunkter att enskilda träd eller trädgrupper särskils,
- 10 b) definierar kännetecken på trädbeståndet från den erhållna längdmodellen, vilka kännetecken på trädbeståndet är egenskaper på enskilda träd eller trädgrupper och/eller information om vidare områden som erhållits med hjälp av dessa.

21. Datorprogram enligt patentkrav 20, k ä n n e t e c k n a t därav att det utför ett förfarande enligt något av patentkraven 4

1/7

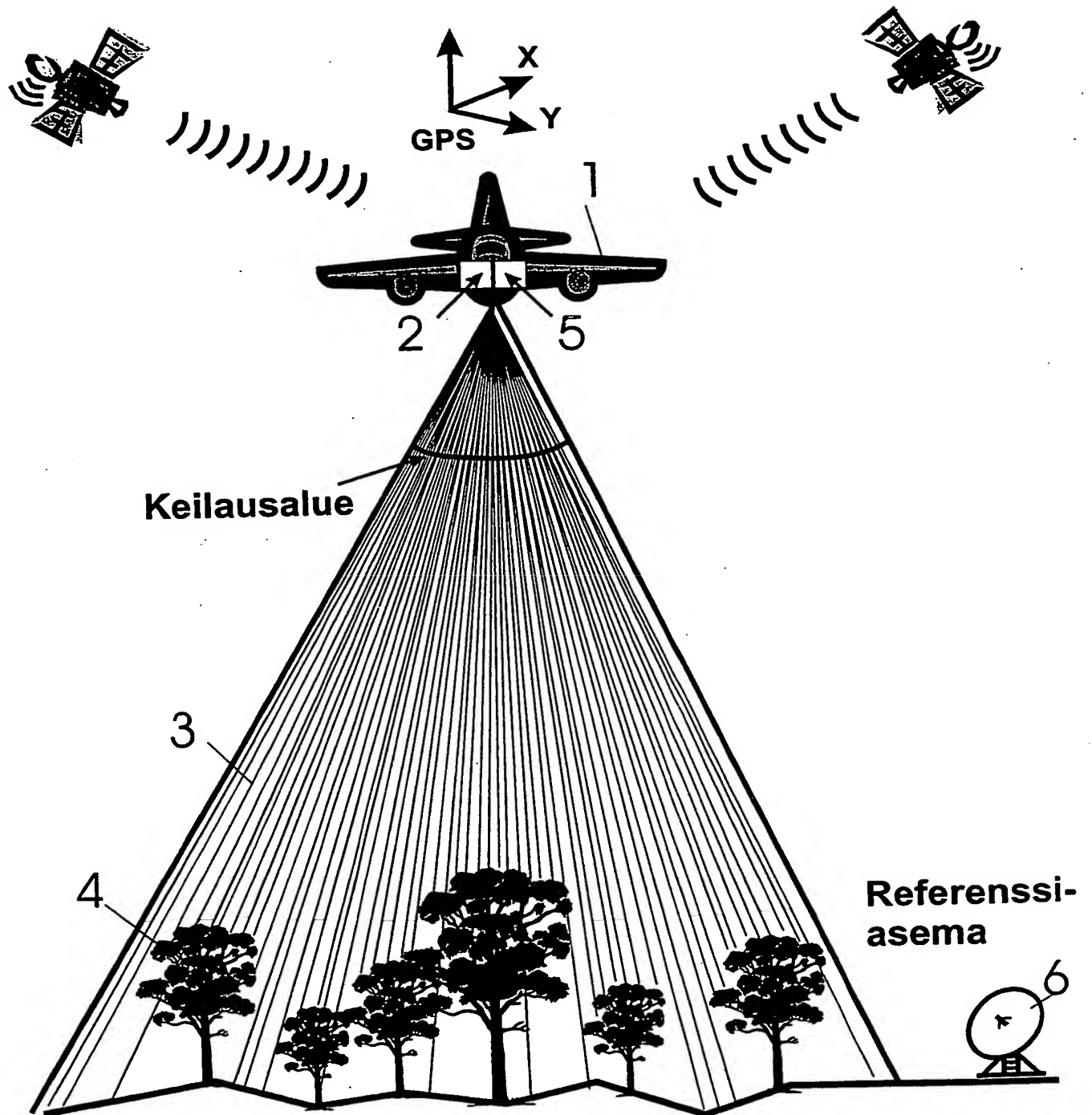


FIG. 1

2/7

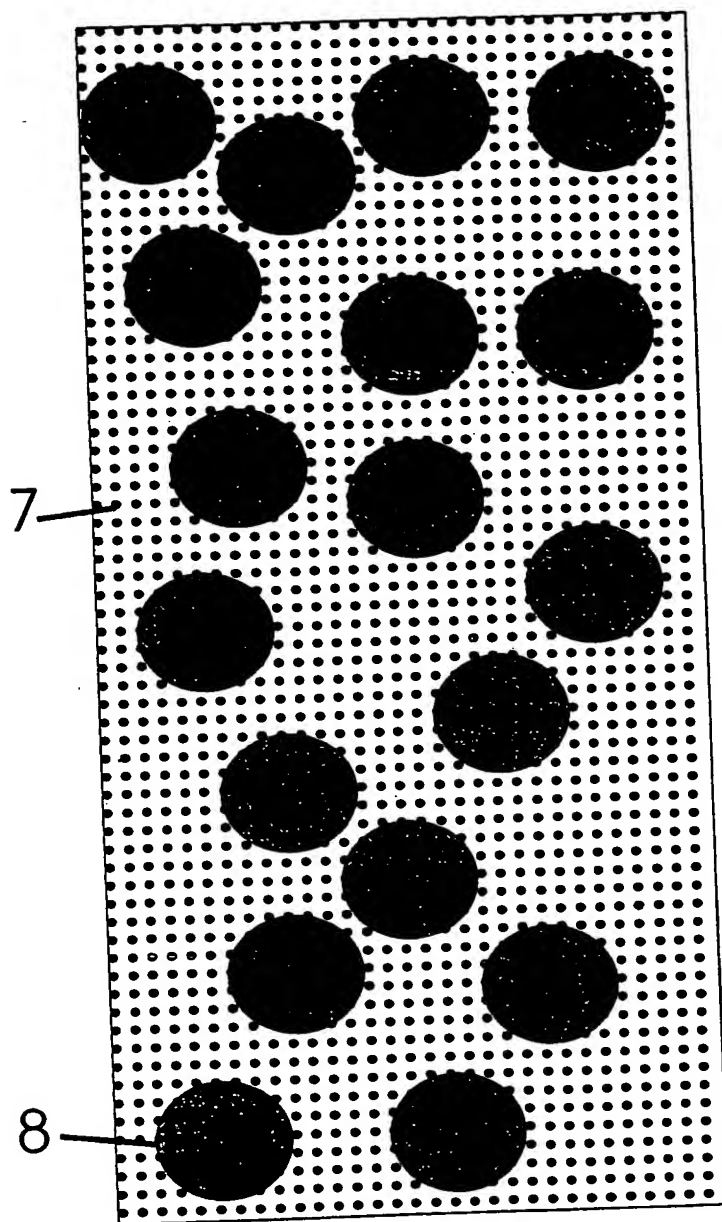


FIG. 2

3/7

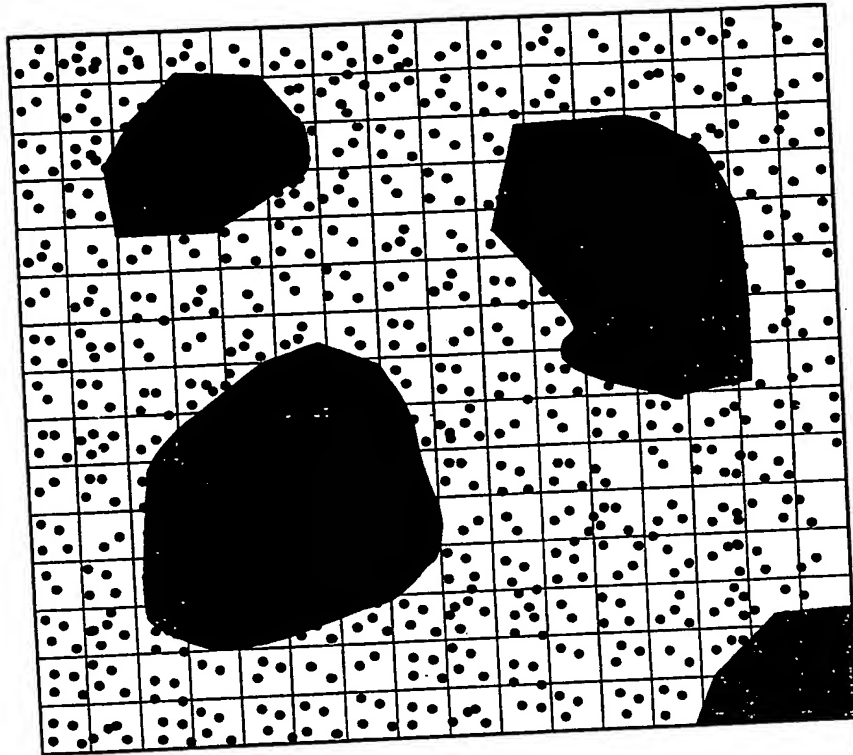


FIG. 3

4/7

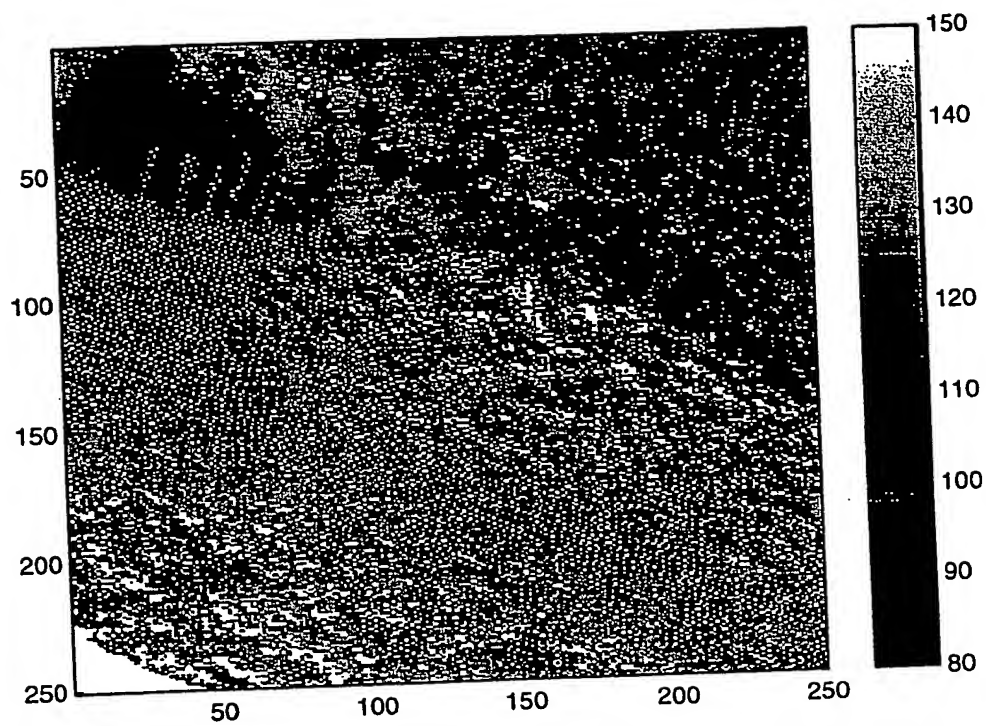


FIG. 4

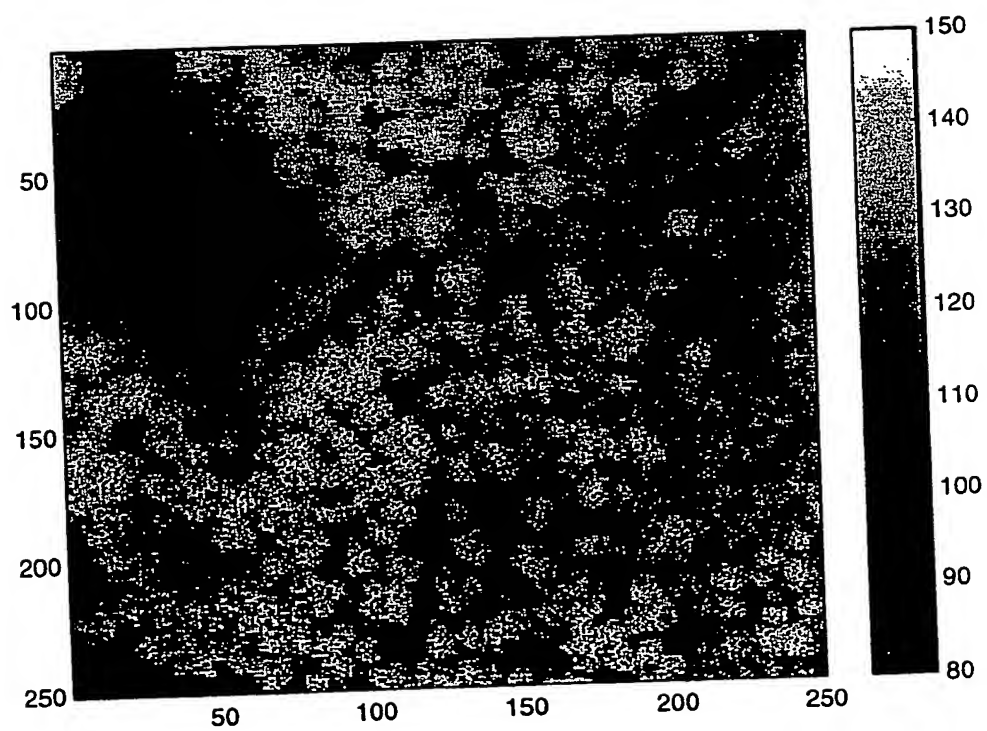


FIG. 5

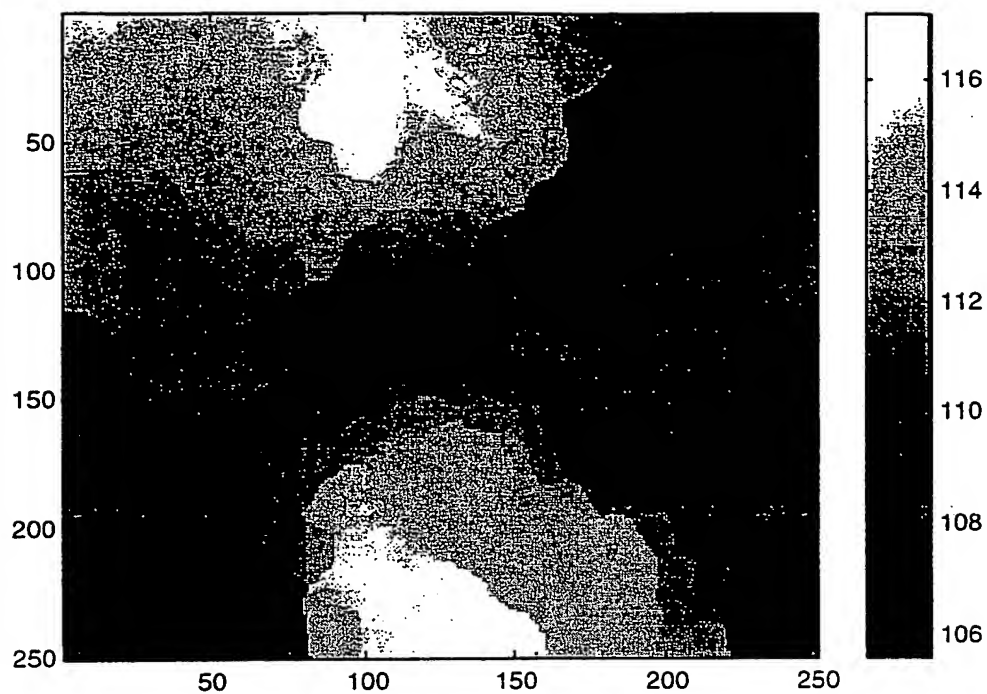


FIG. 6

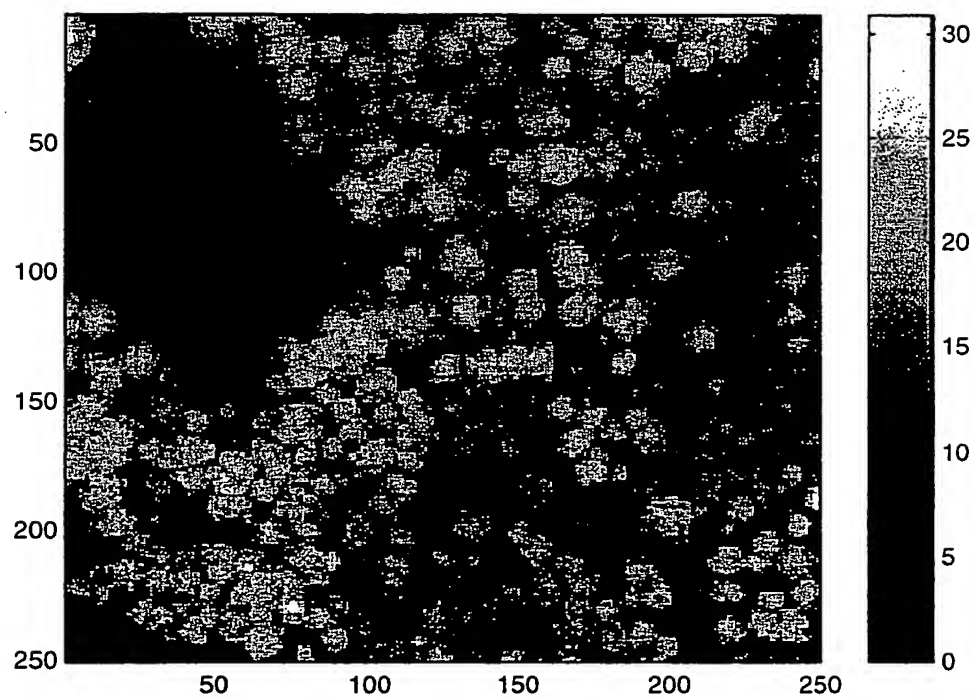


FIG. 7

6/7

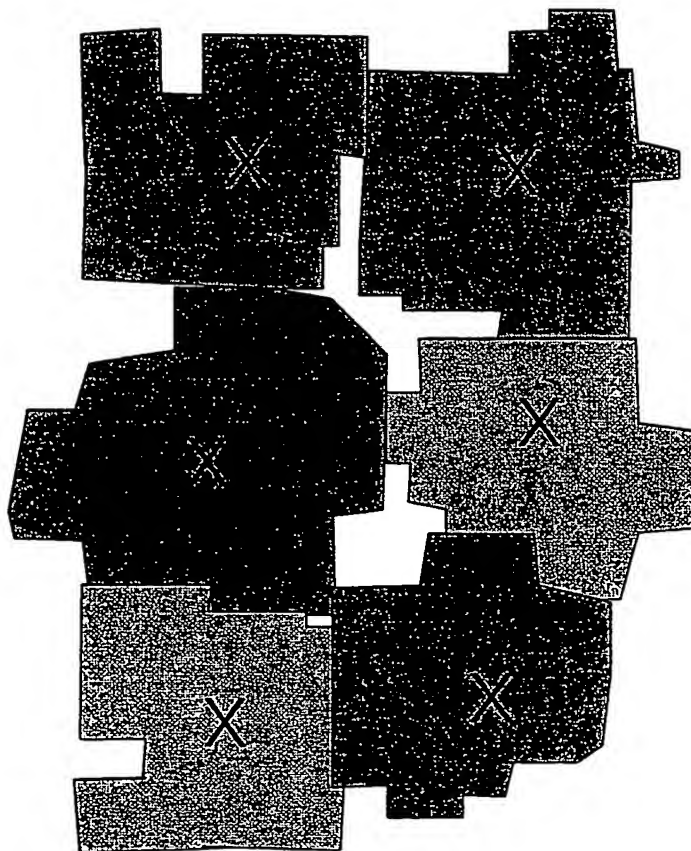


FIG. 8

7/7

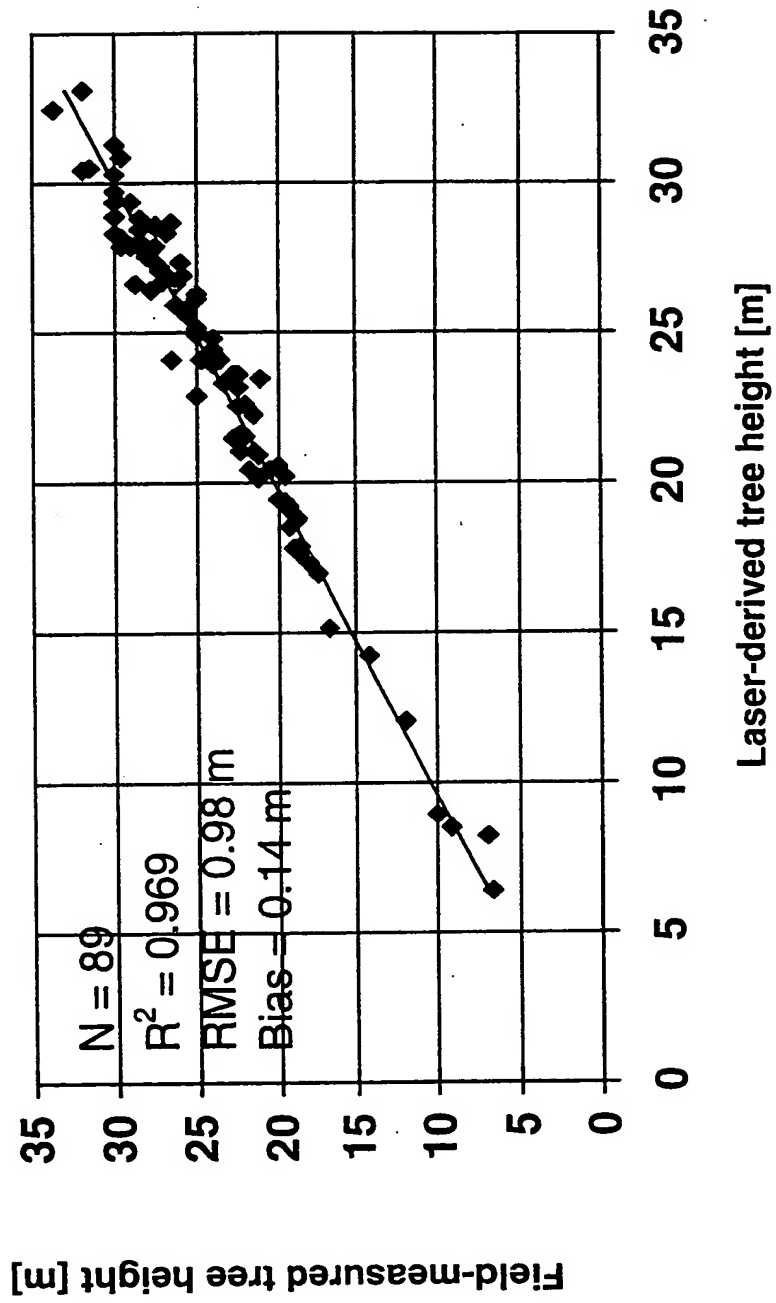


FIG. 9